



TITLE:

Study on Growth of High Quality Corundum Gallium Oxide on Sapphire Substrates(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Jinno, Riena

CITATION:

Jinno, Riena. Study on Growth of High Quality Corundum Gallium Oxide on Sapphire Substrates. 京都大学, 2020, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2020-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22450>

RIGHT:

許諾条件により本文は2021-03-01に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	神野 莉衣奈
論文題目	Study on Growth of High Quality Corundum Gallium Oxide on Sapphire Substrates (サファイア基板上高品質コランダム構造酸化ガリウムの成長に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、コランダム構造酸化ガリウム（$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$）が高耐圧・低損失のパワーデバイスとして有用な物理パラメータを持つことに着目し、結晶および構造の高品質化に向けた基盤技術および材料物性に関する研究をまとめたものであって、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、パワーデバイス材料の観点でサファイア基板上に成長した$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$の特徴を述べている。とくに、結晶成長において従来用いられてきたミスト気相成長（CVD）の利点と問題点を考察し、ヘテロ接合デバイスの成長において分子線エピタキシャル成長（MBE）を用いる必要性について指摘している。$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$のデバイス応用に向けて解決すべき課題と必要となる基盤技術についてまとめ、本研究の目的を明確にしている。</p> <p>第2章では、ミスト CVD による $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の結晶成長において、不純物の混入を低減するために、炭素フリーの塩化ガリウムを原料とした結果について述べている。これにより、炭素および塩素の混入量を実験に用いた二次イオン質量分析装置の検出限界以下（それぞれ、$<1\times10^{17}\text{ cm}^{-3}$、$<1\times10^{15}\text{ cm}^{-3}$）に低減することに成功している。また GaCl と GaCl₃ ガスの濃度に律速される結晶成長メカニズムを提唱し、これをもとに成長条件を最適化して、RMS 粗さ 0.19 nm の平坦な表面モフォロジーを実現し、数 nm/min~130nm/min (7.8μm/h) の広い範囲で成長速度が制御可能となったことを述べている。</p> <p>第3章では、多層構造デバイスを目的に、$\alpha\text{-(Al,Ga)}_2\text{O}_3$ 混晶薄膜上における Ga₂O₃ の結晶構造の制御について述べている。これは、$\alpha\text{-(Al,Ga)}_2\text{O}_3$ 混晶薄膜上では、$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ よりも格子整合度の高い $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が成長しやすくなるためである。下地となる $\alpha\text{-(Al,Ga)}_2\text{O}_3$ 混晶薄膜表面の終端構造が $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の結晶構造に影響を与えるモデルを提唱し、下地が平坦で原料の拡散長が十分に大きいことがコランダム構造の形成に必要なことを示している。</p> <p>第4章では、サファイア基板上の $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のヘテロエピ成長に起因する欠陥を低減する試みについて述べている。界面への疑似組成傾斜バッファ層の導入を提唱し、らせん転位密度が増加するものの刃状転位密度が約 2 桁減少することを示している。また、横方向選択成長を行い、a 面基板上において、マスク中心直上の貫通転位密度を実験に用いた透過型電子顕微鏡での観察限界以下（$<1.6\times10^7\text{ cm}^{-2}$）にまで低減できたことを述べている。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	神野 莉衣奈
<p>第5章では、急峻な界面構造を持つヘテロ接合デバイスの作製には MBE を用いることが望ましいと提言し、MBE によるコランダム構造結晶の成長条件について調べている。m 面基板の利用により、$\alpha\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 混晶の全組成域においてコランダム構造が得られ、5.34~8.56 eV にわたるバンドギャップ変調に成功している。一方、Ga-rich のサンプルには積層欠陥が多くみられ、結晶品質の向上が必要であると提言している。</p> <p>第6章では、熱処理による $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の構造安定性を調べている。膜厚や構造が異なる試料における $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の β 型への相転移温度の違いを調べ、相転移は薄膜中の歪による影響が大きいことを見出して、薄膜内の不均一な歪みを低減することにより結晶相が安定しうることを示している。また、今後より高い熱的安定性をもたらす試料構造について提言している。</p> <p>第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、研究成果の波及効果および今後の展開について提言を行っている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、コランダム構造酸化ガリウム ($\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$) が高耐圧・低損失のパワーデバイスとして有用な物理パラメータを持つことに着目し、結晶および構造の高品質化に向けた基盤技術および材料物性に関する研究をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. ミスト CVD による $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の結晶成長において、炭素フリーの塩化ガリウムを原料に用い、不純物である炭素および塩素の混入量を実験に用いた二次イオン質量分析装置の検出限界以下 (それぞれ、 $<1\times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 、 $<1\times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$) に低減した。また GaCl と GaCl_3 ガスの濃度に律速される結晶成長メカニズムを提唱し、これをもとに成長条件を最適化して、RMS 粗さ 0.19 nm の平坦な表面モフォロジーと、数 nm/min~130nm/min (7.8 $\mu\text{m/h}$) の広い範囲での成長速度制御を実現した。
2. 多層構造デバイスを目的に、 $\alpha\text{-(Al,Ga)}_2\text{O}_3$ 混晶薄膜上における Ga_2O_3 の結晶構造の制御について調べた。これは、この混晶薄膜上では、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ よりも格子整合度の高い $\varepsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が成長しやすくなるためである。 $\alpha\text{-(Al,Ga)}_2\text{O}_3$ 混晶薄膜表面の終端構造が $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の結晶構造に影響を与えるモデルを提唱し、下地が平坦で原料の拡散長が十分に大きいことがコランダム構造の形成に必要なことを示した。
3. サファイア基板上的 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のヘテロエピ成長に起因する欠陥を低減する目的で、界面に疑似組成傾斜バッファ層を導入して、らせん転位密度が増加するものの刃状転位密度が約 2 桁減少することを示した。また、横方向選択成長を行い、a 面基板上において、マスク中心直上の貫通転位密度を実験に用いた透過型電子顕微鏡での観察限界以下 ($<1.6\times 10^7\text{ cm}^{-2}$) にまで低減させた。
4. 急峻な界面構造を持つヘテロ接合デバイスの作製には MBE を用いることが望ましいという観点で、MBE によるコランダム構造結晶の成長条件について調べた。m 面基板の利用により、 $\alpha\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 混晶の全組成域においてコランダム構造が得られ、5.34~8.56 eV にわたるバンドギャップ変調に成功した。一方、Ga-rich のサンプルには積層欠陥が多くみられ、結晶品質の向上が必要であることを明らかにした。
5. 膜厚や構造が異なる試料における $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の β 型への相転移温度の違いを調べ、相転移は薄膜中の歪による影響が大きいことを見出して、薄膜内の不均一な歪みを低減することにより結晶相が安定しうることを示した。また、今後より高い熱的安定性をもたらす試料構造について提言した。

本論文は、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ を用いた高耐圧・低損失パワーデバイスにつなげる知見を得たもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 2 年 1 月 31 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降